

国外石油机械

原油脱水用紧凑型静电预聚结技术 (二)^{*}

陈家庆¹ 初庆东¹ 张宝生¹ 丁艺¹ 王春升²

(1. 北京石油化工学院机械工程学院 2. 中海石油有限公司北京研究中心)

摘要 IEC、VIEC、LOWACC是原 ABB Offshore Systems公司自 1999年以来研制开发的紧凑型静电预聚结系列产品, 在当前的紧凑型静电预聚结技术中具有较大影响力。介绍了 IEC和 VIEC的基本结构 and 应用研发情况。VIEC兼顾了 IEC的静电预聚结功能和常规三相分离器内穿孔板的整流功能, 目前已经成为 Aibel公司的主导产品, 在十余处海洋石油开发中得到成功应用。随着稠油静电聚结脱水等技术难题的逐步攻克, VIEC和 HIVIEC技术将与油井产出液的第 1级三相分离器结合得更为紧密。

关键词 原油乳化液 原油脱水 在线静电聚结器 容器内置式静电聚结器

0 引言

原油脱水用紧凑型静电预聚结技术就是在对 W/O型原油乳化液进行脱水处理的过程中, 将分散相水颗粒的聚结长大和重力沉降 2个环节分开实施, 从而克服传统电脱水器占地面积较大、工作效率和处理性能难以进一步提高等不足。除了文献 [1] 中 Natco集团所研发的静电脉冲诱导聚结器 (EPIC)、Kvaerner Process Systems公司的紧凑型静电聚结器 (CEC) 之外, 原 ABB Offshore Systems (后独立为 Aibel公司) 所研发的 IEC、VIEC、LOWACC系列产品在当前的紧凑型静电预聚结产品中具有较大影响力, 尤其是 VIEC已经在海洋石油开发中得到了多次成功应用。笔者对 IEC和 VIEC的基本结构、应用研发情况进行系统介绍。

1 在线静电聚结器 (IEC)

自 1999年以来, ABB研究中心在代号为 “PP 2000” 项目的支持下, 开始研究紧凑型分离 (Co-Sep) 技术, 第 1代紧凑型静电预聚结产品为在线静电聚结器 (Inline Electrostatic Coalescer, IEC)^[2]。如图 1所示, IEC总体上采用单管流道,

其中的钢制片状电极螺旋缠绕在聚四氟乙烯薄壁管的外圆周上。变压器内置于 IEC中而采用低压供电, 以避免在 IEC外部使用高压切换器。由于钢制电极不与原油乳化液直接接触, 所以即使在含水质量分数或含气体积分数高达 100%时也不会出现垮电场现象^[3]。分散相水颗粒在 IEC中的水力停留时间小于 20 s, 出口处的水颗粒粒径增大 10倍以上, 可以将后续常规电脱水器的沉降时间缩短 20~50倍。与 CEC一样, IEC在现场应用时也是被立式安装在常规三相分离器或电脱水器外部的上游侧; 当待处理原油乳化液的流量较大时, 采用多个同规格的 IEC并联工作, 而不采用多个平行同心环空流道的单体结构形式。

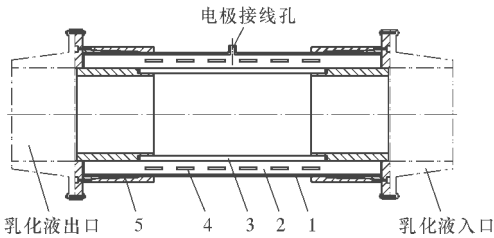


图 1 在线静电聚结器 (IEC) 的结构示意图
1—外壳; 2—外绝缘层; 3—内绝缘层; 4—片状电极; 5—支撑套筒。

在利用挪威 Norsk Hydro 研究中心的相关设施对取自 Veldis 油田的稳定原油乳化液进行了成功测

^{*} 基金项目: 2007年度国家 863 计划专题课题 (2007AA06Z225); 2007年度北京市留学人员科技活动择优资助重点项目; 2008年度教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。

试之后, ABB Offshore Systems于2001年4月在赤道几内亚由Berge Hus改装升级而成的Sendje Ceiba号FPSO上, 首次在第2级三相分离器(或称低压分离器)前旁路安装了CoSep系统样机。如图2所示, 整个系统包括1个紧凑型同心圆柱状旋流器(Compact Concentric Cylindrical Cyclone, 4C)和4个并联立式安装的IEC^[4]。每个IEC的尺寸为 $\phi 355.6\text{ mm} \times 2\,336.8\text{ mm}$, 质量不足1 t, 处理能力为 $132.5\text{ m}^3/\text{h}$, 内部可以产生高达20 kV的交流电场, 总耗电功率小于2 kW。2003年运行了9个月, 结果表明, 含水质量分数为3%、密度为 801.7 kg/m^3 的原油乳化液, 在交流电场下经过3 s的静电聚结后, 水颗粒粒径由入口处的 $3\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $130\text{ }\mu\text{m}$ 。在IEC和4C共同作用下第2级三相分离器出水口的含油质量分数比原来减少了50%。

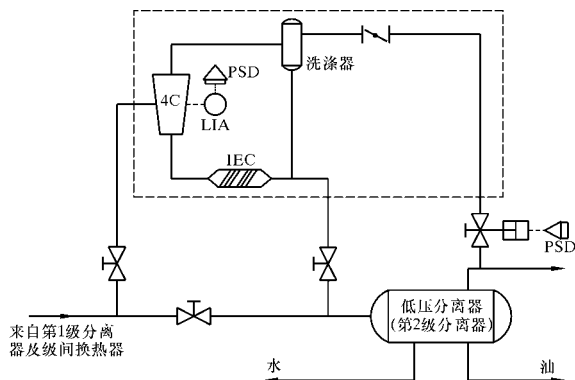


图2 Sendje Ceiba号 FPSO上紧凑型分离 (CoSep) 系统的工艺流程布置示意图

2004年6月, Aibel公司在Norsk Hydro研究中的多相流循环流道上, 进行了IEC海底样机的测试工作, 以期应用于海底生产系统。

IEC的不足之处在于: ①聚结后的乳化液在进入后续沉降分离设备之前, 可能会因管路中弯头、阀门等处的剧烈剪切作用而使较大的分散相水颗粒再次发生破裂; ②在大处理量下需要并联多个单管立式结构, 总体占地面积较大。可能受研发重心转移和同类产品CEC光芒遮掩等因素的影响, Aibel公司近4年来并未继续该产品的研发, 也未再对该产品予以宣传介绍。从笔者所掌握的最新资料来看, IEC的部分技术细节似乎正在被CEC的研究人员借鉴采用。

2 容器内置式静电聚结器 (VIEC)

2.1 基本结构

ABB研究中心还与挪威科技大学 (NTNU)、

SNIEF等机构合作, 以深入了解静电聚结过程中所涉及的基本化学和物理问题。研究工作的最终目标是将油气集输处理阶段所用三相分离器或电脱水器的数量由3个减少到2个, 对于海洋油气开发而言则希望相应减轻 $1\,000 \sim 4\,000\text{ kN}$ 的平台荷重, 这些机理性研究导致了容器内置式静电聚结器 (Vessel Internal Electrostatic Coalescer, VIEC) 的问世。为了避免出现新的空间占用, VIEC被设计成穿孔板墙状, 安装在三相分离器内部上游侧的整流段处。为了能够在第1级三相分离器中使用VIEC技术, 要求每个静电预聚结元件能够在水、乳化液、气泡共存的情况下正常工作而不会出现垮电场现象。典型的VIEC包括位于三相分离器内部的电极模块组件、穿过分离器的电力接入穿舱组件、位于附近控制室内的电源及其控制器件等3部分^[5]。

(1) 电极模块组件 如图3所示, 每个电极模块组件的尺寸大小为(长 $\times$ 宽 $\times$ 厚) $450\text{ mm} \times 450\text{ mm} \times 120\text{ mm}$, 可以通过直径为 609.6 mm 的人孔送入三相分离器内。金属板状电极呈正方形网格排列, 每个网格内部居中放置 $\phi 25\text{ mm}$ 的Teflon中空管, 开孔率为20%~40%, 将各金属电极板、Teflon中空管以及变压器采用环氧树脂在真空条件下整体模压浇注成型。通过变压器将外部供应的低压电升压后, 经金属电极板向管内的流动流体施加高压电场。

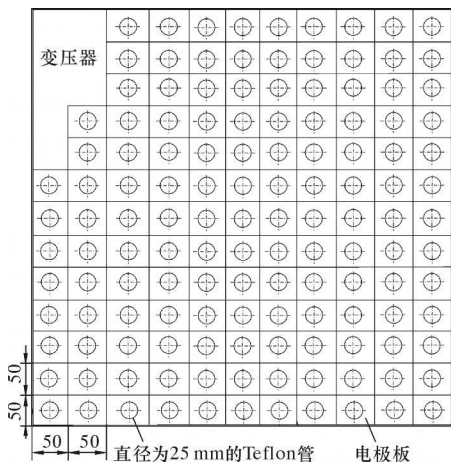


图3 管式流道 VIEC电极模块组件的结构示意图

每个Teflon中空管内的流动状态为湍流。湍流一方面增大了原油乳化液中水颗粒的碰撞几率, 另一方面缩短了水力停留时间(1~3 s), 后者取决于原油特性及其在分离器内的纵向高度。由于聚结长大后的水颗粒可以在其内重力沉降形成1层水膜, 所以每个中空管还可以起微型重力分离器的作用。Aibel公司早期在实验室内采用有机玻璃分离

器进行的测试表明, 电极模块组件中空管的出口处能形成水瀑。

(2) 电力接入穿舱组件 电力接入穿舱组件用于向电极模块组件提供 0~100 V 的电压, 采取 3 级保护以避免液体浸入而影响金属丝的导电能力。从每个电极模块组件内嵌变压器引出的低压金属接线丝汇集并采用环氧树脂浇注固定在扁圆柱段内, 然后以螺纹联接的形式旋入一个管状不锈钢外壳。外壳下端与穿舱法兰内端面之间形成一个带压腔室, 里面充满了绝缘油。穿舱法兰中心内孔处为由玻璃浇注成型的金质多针插头, 与低压金属接线丝构成有效连接, 设计耐压能力为 40 MPa。

与穿舱法兰容器壳体外端多针插头一侧相连的金属接线丝接入经过 ATEX 认证的接线盒里, 最后通过标准的多芯 BROU 海洋电缆与供电器件相连。

(3) 电源及其控制器件 所有来自三相分离器的电缆与位于最近安全区域控制室内的接线盒相连, 然后将与每个电极模块组件对应的电缆与特定的频率转换器连接, 通过频率转换器基于脉宽调制技术输出 0~100 V 的正弦波。根据所处理原油乳化液特性的不同, 基于 DSP 的信号发生器允许对频率和振幅进行在线调节以获得最优工作点。频率的量级为数千赫兹、电压的量级为数千伏。单个电极模块组件的功率消耗小于 50 W (低电流、高电压技术) 与传统静电聚结器所用的 50/60 Hz 重型变压器相比, VEC 的供电设备堪称微型。

除了调整电力参数设置值之外, 值班人员还可通过 PC 机在控制室内对各电极模块组件的运行状态进行监控。VEC 控制箱与 PC 机之间的通讯电缆为标准双绞线, 适用于 2×RS486 通信。

2.2 技术认证和前期测试

挪威 Norsk Hydro 公司的 Troll C 采油平台自 1999 年开始投产, 但第 1 级三相分离器内的液位难以控制, 有时乳化液层厚达 1 000 mm, 化学破乳剂的消耗量较大, 工作状况难以令人满意。由于出油口的含水质量分数较高 (>10%), 大量的水进入第 2 级三相分离器, 所以与第 1 级三相分离器配套的采油废水处理设施负荷不足, 而与第 2 级三相分离器配套的采油废水处理设施超负荷运行, 遇到紧急事故时不得不将原油排放到采油废水中。在经过内部评估之后, Norsk Hydro 公司决定对 Troll C 采油平台上的第 1 级三相分离器进行维修改装, 并在其内应用 VEC。

在挪威政府 DEMO 2000 计划的支持下, Det Norske Veritas (DNV) 对环氧树脂在烃类设备中的

耐用性、安全性以及安装可行性等进行了评估认证。与此同时, 在 Norsk Hydro 研究中心的多相流循环流道上, 分别使用密度为 927.9、881.6、865.4 kg/m³ 的 3 种原油 (第 2 种取自 Troll C), 对 VEC 的工作性能进行了测试, 测试温度为 55 °C、测试压力为 4.0 MPa^[6]。图 4 给出了使用 Troll C 原油且不添加破乳剂时, 不同入口原油含水质量分数下 VEC 的工作性能。从图 4 可见, 在入口原油含水质量分数低于 60% 且 VEC 不通电时, 不发生分离; 当 VEC 开始通电时, 分离器出油口的含水质量分数为 6% 甚至更低, 展示了很好的静电聚结破乳分离能力。

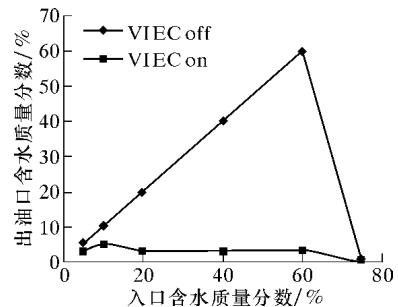


图 4 采用 VEC 技术处理 Troll C 原油时的工作性能对比

与此同时, 对采油废水的水质也全部进行了检测分析。对于密度为 927.9 和 881.6 kg/m³ 的原油乳化液而言, 无论 VEC 通电工作与否, 水质几乎没有变化; 但对于密度为 865.4 kg/m³ 的原油而言, 水质得到了显著改善。

2.3 首次现场试验

2003 年 6 月, ABB Offshore Systems 公司在 Troll C 采油平台的第 1 级三相分离器中正式安装使用 VEC 技术^[7]。该三相分离器的尺寸为 $\phi 4\ 600\text{ mm} \times 15\ 400\text{ mm}$, 两端呈对称布置且各带有 $\phi 609.6\text{ mm}$ 的人孔, 油井产出液从轴向中心进入, 处理量为 1 457.4 m³/h。一般而言, 根据三相分离器的尺寸大小及其内油层、乳化液层的厚度, 需要堆砌不同数量的电极模块组件。如图 5 所示, Troll C 采油平台第 1 级三相分离器中油层和油水乳化液层的厚度为 1 500~3 000 mm。为了兼顾全部油水乳化液层的厚度, 在 1 750~2 650 mm 的高度范围内堆砌电极模块组件 (即总高为 900 mm)。这些电极模块组件位于入口旋流组件下游 1 250 mm 处, 其最上部和最下部仍然安装使用双层穿孔板。总共安装的 36 个电极模块组件分别与各自频率转换器的控制单元相连, 而整个控制单元又采用 2 个独立的直流电源供电, 总耗电量仅为 1 kW。

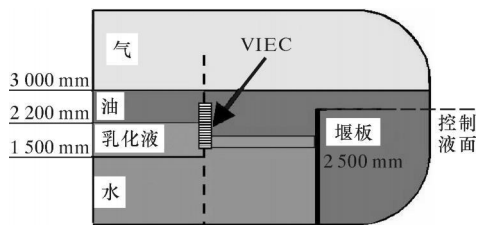


图 5 第 1 级三相分离器内部 VIEC 电极模块组件的安装示意图

在封闭三相分离器之前，在干式环境下通电检查所有 VIEC 电极模块组件的接线是否正确。在常规生产处理操作恢复运转之后，2003 年 7 月正式开始通电运行，第 1 级三相分离器的处理效果立即得到了显著改善。采用 Synetix 密度轮廓仪对分离器内的纵向密度变化情况进行了可视化显示，结果发现当 VIEC 断电时，从上部油层到底部水层之间的密度增加很慢，这表明分离器中的大部分液体呈乳化状态；但 VIEC 通电之后，在油层和水层之间有一个明显的分界面，乳化液层的厚度从 1 000 mm 减薄到 200 mm，减少了 80%。此外还进行了数次测试，以确定电极模块组件的最优电压值，目前的最优值为最高电压的 75%。

采用 VIEC 技术之前，基于室内试验而采用的破乳剂用量为 10×10^{-6} ，改装后下降至 2×10^{-6} ；在 2004 年 1 月，破乳剂用量减少到 1.5×10^{-6} ，预计凭此 1 项每年即可节省 60 万美元。2003 年第 4 季度，当含气量较低时，出油口的含水质量分数从 10% ~ 15% 下降至 4.8%；在设计含气量下，出油口的含水质量分数从大于 20% 下降到 10% 左右。一家独立公司对紧随第 1 级三相分离器下游侧采油废水中的油滴粒径进行了测试，发现油滴粒径由安装 VIEC 前的 $7 \mu\text{m}$ 增大到了 $20 \mu\text{m}$ ，为后续采油废水的处理带来了极大便利^[7]。

由于现场测试性能优良，VIEC 入选了 2004 年度世界海洋技术年会（OTC）的 15 项创新技术。2006 年 3 月 Framphs 油井产出液回接到 Troll C 采油平台，处理量由 $417.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 上升到 $616.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ，但通过使用 VIEC 技术较好地适应了上述变化。

2.4 在我国西江油田 Munin 号 FPSO 上的应用

VIEC 技术的第 2 个现场应用案例发生在中海油与 ConocoPhillips 公司共同开发的西江油田，但迄今仍鲜为国内从业人员所知。当时在该油田服役的南海开拓号 FPSO 将进行例行维护检修，为此计划租用正在陆丰油田作业的 Munin 号 FPSO（Bluewater 公司所有）。为了确保 Munin 号 FPSO 在接下来的几年里能够顺利服役，Bluewater 公司计划利

用难得的入坞期进行较为彻底的维修和延寿处理，以便在西江油田的合同任务结束后直接返回陆丰油田服役。Munin 号 FPSO 在陆丰油田的处理量为 $331.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ，而在西江油田的处理量为 $496.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ，来自西江油田 2 个井口平台的产出液通过管线汇集到 Munin 号 FPSO 上，含水质量分数为 46%，入口温度最低为 86°C ，原油乳化液粘度较高。虽然提高处理能力可以通过增大分离器尺寸或并联增加分离器个数来解决，但因改装时间限制而无法采纳。通过使用 VIEC 技术，在未对整个处理流程进行其它改动的情况下，很好地适应了处理量的大幅度上升^[8]。

Munin 号 FPSO 上第 1 级三相分离器的内部结构沿水平轴线呈对称布置，在改装前期，Aibel 公司的研究人员借助商业计算流体动力学（CFD）软件 CFX5.7 版，对其在大于原设计处理流量下的工作性能进行了数值模拟和优化设计。首先通过单相流模型研究分离器入口管处的流体喷射形态，对入口管进行改装以确保来流均匀分布，降低入口流速和相应的湍流负面效应；然后通过两相流模型，模拟 VIEC 通电前后的油水分离过程，结果发现在 VIEC 稳定工作后水会回流，而且同时在两边的 VIEC 上都出现了“水位线”，这与室内试验结果基本一致^[9]。

2004 年 6 月 28 日，Munin 号 FPSO 停止了在陆丰油田的服役；2004 年 10 月，改装后的 Munin 号 FPSO 正式开始运行。应该强调指出的是在 Munin 号 FPSO 的现场应用中，Aibel 公司改进了 VIEC 电极模块的结构，将单个流动通道由圆形变成了准矩形（如图 6 所示），电极模块组件的结构尺寸为（长 × 宽 × 厚） $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ 。

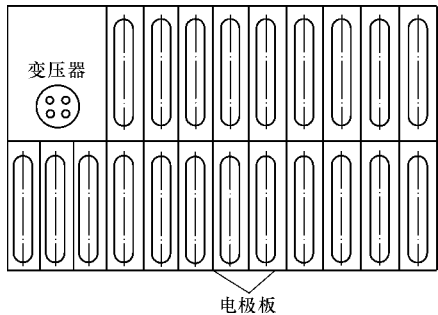


图 6 准矩形流动 VIEC 电极模块组件的结构示意图

2.5 针对稠油脱水的研究

由于稠油的粘度较高，且油水两相之间的密度差较小，所以分散相水颗粒更难发生重力沉降。为了改善脱水效果，往往加热至较高的温度以降低连续油相的粘度。此外，出于稠油降粘输送的需要，

往往将分离器上游的 W/O型乳化液反相为 O/W型乳化液，而当其进入三相分离器后需要逆转为 W/O型并尽快脱水^[10]。

（1）针对稠油的测试工作 2005年前后，一家油公司遇到了密度为 952.9 kg/m³ 的稠油脱水问题，采用重力沉降、化学破乳和加热等方法均无法予以有效解决，因此 Aibel 公司尝试采用 VIEC 技术。测试工作采用真实原油在 Norsk Hydro 研究中心的多相流循环流道上进行，含水质量分数、水力停留时间和气液比（GLR）都与实际作业条件一致^[11]。

图 7 是分离器入口含水质量分数分别为 15%、30%、50%和 80% 时出油口含水质量分数的变化情况，采用 A B C D 4 种参数组合进行测试，其中参数组合 A 代表：水力停留时间为 6 min，气液比为 0，分离器的附加压力差为 0，破乳剂的用量为 0，其余类推。图中过星号斜线代表“无分离线”，亦即入口处和出口处的含水质量分数相等。从图中可以看出，当 VIEC 未带电时，全部依靠重力沉降基本上不发生分离，仅仅当入口含水质量分数高达 80% 时才发生些许分离；当 VIEC 带电时，在各种入口含水质量分数下的分离效果都得到了很大改善，出油口的含水质量分数都为 4%~5%。

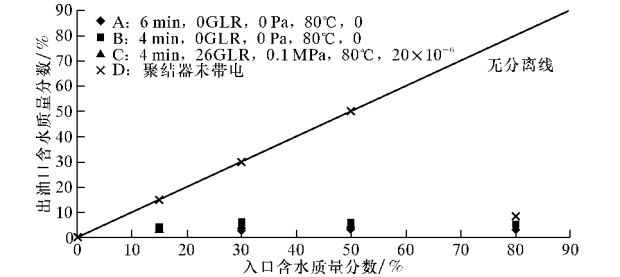


图 7 VIEC 技术用于稠油脱水时分离器入口和出油口含水质量分数的变化情况

与此同时，对出水口的水质也进行了测试分析，所有的试样都注入 80×10^{-6} 的破乳剂，出水口的含油质量分数都低于 100×10^{-6} ，远好于相同条件下常规重力分离器所能得到的水质。在 100℃ 以下所取的部分水样中甚至没有分析出油分 ($< 2 \times 10^{-6}$)，肉眼观察这些水样显得较为清澈^[12]。

最近的测试表明，对于密度为 952.9 kg/m³ 的稠油而言，采用 VIEC 技术可以将加热温度从 120℃ 下降到 80℃，水力停留时间减少 60% 以上，出水口的含油质量分数低于 10%。

（2）高温 VIEC (HTVIEC) 常规 VIEC 电极模块组件的适用温度范围为 80~90℃，在稠油脱水所需高温环境中的可靠性较差。为此，Aibel 公司从

材料、成型工艺方面对其进行了改进，推出了高温 VIEC (HTVIEC) 技术。单个 HTVIEC 电极模块组件的质量为 75 kg，能够适应 150℃ 的高温环境。

为了在接近现场实际的工况条件下研究 HTVIEC 的工作性能，Aibel 公司在 NTNU 建立了一个试验台架。该试验台架的测试温度高达 140℃，容积为 1 000 mL，采用 N₂ 加压；采用尺寸为 $\phi 25.4$ mm 的通孔，能够模拟 VIEC 电极模块组件中单个流道的真实流动条件^[13]。在该试验架上先后对密度为 989.5、979.2 kg/m³ 的原油进行了测试，图 8 为后者的测试结果。图中参数组合 VIEC ON/OFF 30% 110℃ 表示：VIEC 带电/不带电、入口含水质量分数为 30%、测量温度 110℃；其余类推。从图中可以看出，①当入口含水质量分数为 30% 时，VIEC 带电后出油口的含水质量分数可以下降到 8% 以下；②在 125℃ 时 VIEC 的作用相当于加入 100×10^{-6} 的化学破乳剂。

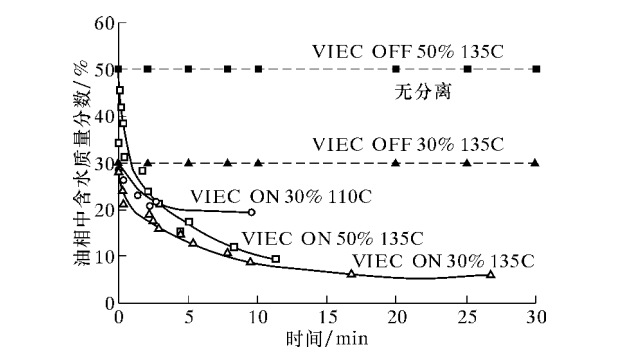


图 8 HTVIEC 技术用于密度为 979.2 kg/m³ 稠油脱水时的测试结果

2008 年 4 月 1 日，Teekay Petrojarl Production (TPP) 公司与 Aibel 公司签订合同，准备在 Petrojarl Cidade de Rio das Ostras 号 FPSO 上安装 HTVIEC 样机，以在巴西 Campos 盆地 Badejo 油田的 Sir 油藏开采密度为 979.2 kg/m³ 的原油，工作温度为 140℃。

3 结 论

（1）EC 是原 ABB Offshore System 公司研制的第 1 代紧凑型静电预聚结产品，采用单管流道立式结构，处理量较大时需要并联若干个单管结构。由于采用绝缘薄壁管材与乳化液直接接触，因而抗静电击穿能力较强，可用于含水质量分数或含气体积分数为 100% 的场合，但目前的发展前景不如 CEC。

（2）VIEC 技术的实质是将 EC 的静电预聚结功能与常规三相分离器内部整流段有机结合，在不

占用新空间的前提下提高原油乳化液的脱水效率,这种做法堪称三相分离器和原油电脱水技术发展历程上的一个里程碑。其他优点还包括降低化学破乳剂的用量、改善采油废水的水质、改进三相分离器内的液面控制精度等。不足之处是结构较为复杂,对加工制造水平要求较高。

(3) 迄今为止, VIEC技术已在 StatoilHydro公司的 Troll C/Grane油田 / Fram East油田 / Gøst油田、中海油西江油田、卡塔尔 Maersk石油公司的 Al Shaheen油田 / Volve油田 / Vincent号 FPSO 巴西石油公司 (Petrobras) 的 Jubarte P-34 / Marlim油田 P-35号 FPSO/Marlim油田 P-37号 FPSO 英国石油公司 (BP) 的 Valhall油田 / Schiehallion号 FPSO等十余处油田现场使用。随着稠油静电聚结脱水等技术难题的逐步攻克, VIEC和 HIVIEC技术将与油井产出液的第 1级三相分离器结合得更紧密。

参 考 文 献

[1] 陈家庆, 常俊英, 王晓轩, 等. 原油脱水用紧凑型静电预聚结技术 (一) [J]. 石油机械, 2008 36 (12): 75—80.

[2] Knott T Drops in the ocean [J]. Offshore Engineer September 2003 XIII

[3] Bål Jähre Nilsen O — M Midtved G Sande Electric coalescer device WQ 2001/085297A1 [B], 2001—11—15.

[4] Daviknes M A N — E Hannisdal The Ceiba Field FPSOs for Phase 1 & 1A [C]. OTC 14085 presentation at the 2002 Offshore Technology Conference held in Houston, Texas 2002 (5): 3—6.

[5] Wolff E A Knutsen T L Advanced electrostatic internals in the 1st stage separator enhance oil/water separation and reduce chemical consumption on the Troll C Platform [C]. OTC 16321 presentation at the 2004 Offshore Technology Conference held in Houston, Texas 2004 (5): 3—6.

[6] Wojciech P Florjowski M Fulczak M et al Vessel internal electrostatic (VIEC) novel oil-water separation technology [J]. ABB Review 2004 (4): 66—70.

[7] Toftegard L Hauge E Hans Kristian Sundt et al In-

creasing three phase separation efficiency by incorporating electrostatic coalescers into separation baffles [C]. Advances in Multiphase Separation and Multiphase Pumping Technologies Seminar 2004.

[8] Soeters M Buijts H Williams P Temporary replacement of production facilities by a dynamically positioned FPSO [C]. OTC 17363 presentation at the 2005 Offshore Technology Conference held in Houston, TX, USA 2005 (5): 2—5.

[9] Wood D J Kolbu J Bål Jähre Nilsen Modelling of the VIEC — a new device which aids separation [C]. Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas Metallurgical & Process Industries SNIEF/NTNU Trondheim, Norway 2005 (6): 6—8.

[10] Langevin D Poteau S Henaut J et al Crude oil emulsions properties and their application to heavy oil transportation [J]. Oil & Gas Science and Technology—Rev IFP 2004 59 (5): 511—521.

[11] Mosland A M Bål Jähre Nilsen Bjørn Erik Kvilej. VIEC (Vessel Internal Electrostatic Coalescer) — A proven technology for enhancing heavy oil separation and improving produced water quality [C]. Advances in Multiphase Separation and Multiphase Pumping Technologies Conference, Aberdeen, United Kingdom 2005 (9): 1—2.

[12] Bjørn Erik Kvilej, Michaelsen J Bål Jähre Nilsen Subsea separation process qualified for heavy oils (17° API) [C]. Presented at the Deep Offshore Technology Conference and Exhibition, Vitória, Espírito Santo, Brazil 2005 (11): 8—10.

[13] Less S Hannisdal A Erik Bjørklund et al Electrostatic destabilization of water in crude oil emulsions: application to a real case and evaluation of the Aibel VIEC technology [J]. Fuel 2008 87: 2572—2581.

第一作者简介: 陈家庆, 教授, 生于 1970年, 1997年毕业于中国石油大学 (北京), 获工学博士学位, 现从事环保设备、多相流分离技术等方面的教学与科研工作, 任副院长。地址: (102617)北京市大兴区。电话: (010) 81292134。E-mail: Jiaqing@bipr.edu.cn

收稿日期: 2009—01—04
(本文编辑 赵连禄)